

# A BODAI ALEUROLIT FORMÁCIÓ REPEDÉSKITÖLTŐ ÁSVÁNYAINAK VIZSGÁLATA

**LENTI FRUZZSINA ANGÉLA**  
KÖRNYEZETTAN BSC SZAKOS HALLGATÓ



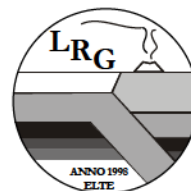
## Témavezető:

*SZABÓ CSABA, PH.D.*, ELTE TTK, LITOSZFÉRA FLUIDUM KUTATÓ LABORATÓRIUM

## Konzulensek:

*NÉMETH BIANKA*, DOKTORANDA, ELTE TTK, LITOSZFÉRA FLUIDUM KUTATÓ LABORATÓRIUM

*AZBEJ TRISTAN*, PH.D. ELTE TTK, LITOSZFÉRA FLUIDUM KUTATÓ LABORATÓRIUM



Eötvös Loránd Tudományegyetem

Természettudományi Kar

Budapest  
2009

## Tartalom

1.Bevezetés.....	4
2. Földtani háttér.....	6
2.1.Tektonikai és rétegtani helyzet .....	6
2.2.A Bodai Aleurolit Formáció közettani jellemzése .....	9
3. A radioaktív hulladékok elhelyezése.....	10
4.A fluidumzárványok vizsgálatának közettani jelentősége.....	12
4.1.A fluidumzárvány vizsgálatok alapjai .....	12
5.Vizsgálati módszerek .....	15
6.Eredmények.....	16
6.1.Petrográfiai vizsgálatok .....	16
6.2.Mikrotermometriai vizsgálatok eredménye: .....	21
7.Diszkusszió.....	24
8. Következtetések.....	27
9.Summary .....	28
9.1.Hereafter .....	29
10.Köszönetnyilvánítás .....	29
Irodalomjegyzék.....	30

## Ábrajegyzék:

1. ábra. Az ALFA-1 vágat földrajzi elhelyezkedése és földtani környezete. A) A lelőhely (vörös, kör alakú jel) Magyarország szerkezeti térképén (Kovács et al., 2000), és az ALFA vágat nyomvonala földtani térképén, Bárdossy (1999) alapján. B) Az ALFA vágat környezetének Ny-K irányú földtani szelvénye (Mecsekérc Környezetvédelmi Rt., 1997). .....	8
2. ábra. Az ALFA1 vágatból származó minták repedéskitöltő kőzeteinek megjelenése. A) makroszkopikus felvétel baritos eret harántoló karbonátos érről. B) Baritos eret harántoló kalciter mikroszkópos képe (1N, áteső fény). C) Baritos és kalcitos erek kontaktusának mikroszkópos képe (1N, áteső fény). D) Aleurolit törmelék (sötétebb mező) tartalmazó telérek (világos mező) mikroszkópos képe (1N, áteső fény). E) Sűrű hasadási nyomvonalakkal szabdalta érkítő kalcit kristályok mikroszkópos képe (1N, áteső fény). .....	18
3. ábra. Az ALFA1 vágatból származó minták érkítő kalcit ásványainak és fluidumzárványainak mikroszkópos felvételei (1N, áteső fény). A) növekedési zónásság kalcit kristályban. B) elsődleges megjelenésű fluidumzárvány sűrű hasadási vonalakkal harántolt kalcitban. C) növekedési zónák menti elsődleges megjelenésű fluidumzárvány sorok kalcit gazdaásványban (a fehér segédvonalak a növekedési zónákat emelik ki). D) kalcit növekedési zónában elhelyezkedő, elsődleges megjelenésű, kétfázisú fluidumzárvány (FZ – fluidumzárvány).....	19
4. ábra. Érkítő kalcitban csapdázódott fluidumzárvány különböző hőmérsékleten, mikroszkópos felvételen (1N, áteső fény). A) kalcit befogadó ásvány, amelyen a primer megjelenésű, kétfázisú fluidumzárványt mértem. B) Fluidumzárvány elhelyezkedése a befogadó ásványfázison belül. C-F) Fluidumzárvány különböző hőmérsékleteken (C - 2 fázisú zárvány szobahőmérsékleten, D megfagyott zárvány -27°C-on, E - 2 fázisú zárvány -8°C-on, fluidumzárvány a teljes homogenizációt követően; FZ – fluidumzárvány). A D, E és F képek ugyanazzal a nagyítással készültek, mint a C kép. ....	22
5. ábra. A H <sub>2</sub> O vázlatos fázisdiagramja. A diagramon az x-tengelyen a hőmérsékletet tüntettem föl °C-ban, az y-tengelyen a nyomást kbar-ban. A kék vonal a H <sub>2</sub> O fázisdiagramjából a folyadék és gőz fázisokat elválasztó forráspontgörbe. A görbe magasabb hőmérsékletű végén kék pont (P <sub>krit</sub> ) jelzi a kritikus pontot, amely fölött a fluidum szuperkritikus állapotú. A homogenizációs hőmérsékleti értékeket vörös színű pont jelzi (T=105°C). Az ebből a hőmérsékleti pontból vetített a fekete szaggatott görbe jelzi a 4% átlagos NaCl szalinitású, 105°C homogenizációs hőmérséklettel jellemzett izochort (Bodnar és Vytik, 1994 alapján). A becsült maximális nyomást jelző egyenes (1,5 kbar, P <sub>max</sub> ) és az izochor görbe metszéspontjának az x tengelyre való merőleges vetülete adja meg a fluidumzárványok maximális képződési hőmérsékletét. ....	25

## Táblázatjegyzék:

1. táblázat A mikrotermomériai mérések eredményei. Rövidítések: T <sub>eut</sub> = eutektikus hőmérséklet, T <sub>olv</sub> = olvadási hőmérséklet, T <sub>h</sub> = homogenizációs hőmérséklet, tf% = térfogat% .....	23
2. táblázat A mért zárványok Bodnár (1993) egyenlete alapján számolt szalinitási értékei ekvivalens NaClm/m%-ban .....	23

## 1.Bevezetés

A paksi atomerőmű működéséből származó nagy aktivitású radioaktív hulladék elhelyezésének egyik perspektivikus geológiai képződménye a Bodai Aleurolit Formáció (a továbbiakban BAF). A kapcsolódó, több mint másfél évtizedes kutató tevékenység fókuszában a BAF közettani és fizikai jellemzőinek megismerése áll. A kutatások eddigi eredményei alapján a formáció tulajdonságai - nagy vastagsága, vertikális és laterális kiterjedése, valamint tektonikailag nyugodt környezete (pl.: Császár, 2005) - alkalmassá tehetik a jó szigetelést igénylő, nagy aktivitású, radioaktív hulladékok tárolására.

Annak érdekében, hogy felmérjük a Bodai Aleurolit Formáció (továbbiakban BAF) adottságait arra nézve, hogy egy korszerű és minden követelményt kielégítő nagy aktivitású radioaktív hulladéktároló létesülhessen benne, szükséges, hogy részletesen megismerjük a formáció fejlődéstörténetét. Ehhez kulcsfontosságú, hogy tanulmányozzuk a kőzetek fluidumoknak való kitettségét a földtörténeti múltban és jelenben. Tudományos diákköri munkámban a BAF-ban mélyített ALFA-1 jelű vágatból (Nyugat-Mecsek) származó reprezentatív minták repedéskitöltő ásványainak genetikáját és fejlődéstörténetét (fluidum-kőzet kölcsönhatását) tanulmányoztam petrográfiai és fluidumzárvány vizsgálati módszerekkel.

### 1.1. Kutatástörténet

A Mecsek hegységben lévő Kővágószőlősi Homokkő Formációból már az 1950-es évek óta bányásztak uránércet. A bányászatot kiegészítő földtani kutatás kiterjedt a teljes perm üledéksorra, így a Kővágószőlősi Homokkő Formáció fektűjét képező BAF-ot is feltárták. A Mecseki Ércbányászati Vállalat (továbbiakban MÉV) 1989-ben kezdeményezte, hogy indítsanak egy kutatóvágatot az uránérc bánya 1050m mélységben elhelyezkedő szintjében. A MÉV saját költségén 750m hosszú vágatot hajtott ki a BAF további feltárására. 1994-ben a kutatóvágat elérte a Formációt, amelyben további vágatokat hajtottak és kutatófúrásokat mélyítettek. A kutatófúrások előzetes eredményei szerint a formáció alkalmas lehet toxikus és radioaktív hulladékok tárolására. A vágatfalból vett mintákon, *in situ* és laboratóriumi vizsgálatokat végeztek, amelyek eredményeiről a MÉV 1995-ben jelentést készített (Mecsekérc, 1997). A nagy aktivitású hulladékok elhelyezésére az önálló kutatási program létrehozását az Országos Atomenergia Hivatal (OAH) kezdeményezte, ezért a MÉV az 1995-1998 közötti időszakra *rövid távú kutatási* programot készített (Kovács et al., 1997). A program irányítását az erre a célra alakult programirányító testület (PIT) végezte, amelynek



tagjai több minisztériumi szervezet, országos hatóság, valamint a Magyar Tudományos Akadémia megbízottjai. A PIT két ütemre osztotta a BAF kutatásait. Az első ütemet a már említett *rövidtávú kutatási program* határozta meg, amelyben a BAF tovább kutatásra való alkalmasságát vizsgálták, illetve az egész országra kiterjedő szakirodalmi felmérést készítettek. A zárójelentést 1998. november 30-ig kellett benyújtani (Bárdossy, 1999). A második ütem még a mai napig érvényben van. Ennek során ki kell jelölni a végleges tárolóhelyet, ezt megkutatni, valamint létrehozni és fenntartani egy kutatólaboratóriumot (URL) a mélyszinten. Továbbá létre kell hozni egy mélyszinti laboratóriumot a tárolóhelyen is. Ebből a mélyszinti laboratóriumból létesítenék a későbbiek folyamán majd a tároló végleges bányászati létesítményeit (Bárdossy, 1999). Azonban az uránbányát 2000-ben bezárták és a bányavágatokat elárasztották vízzel, így sem az ALFA vágat, sem az ALFA-1 vágat a továbbiakban nem hozzáférhető közvetlen mintagyűjtés céljából.

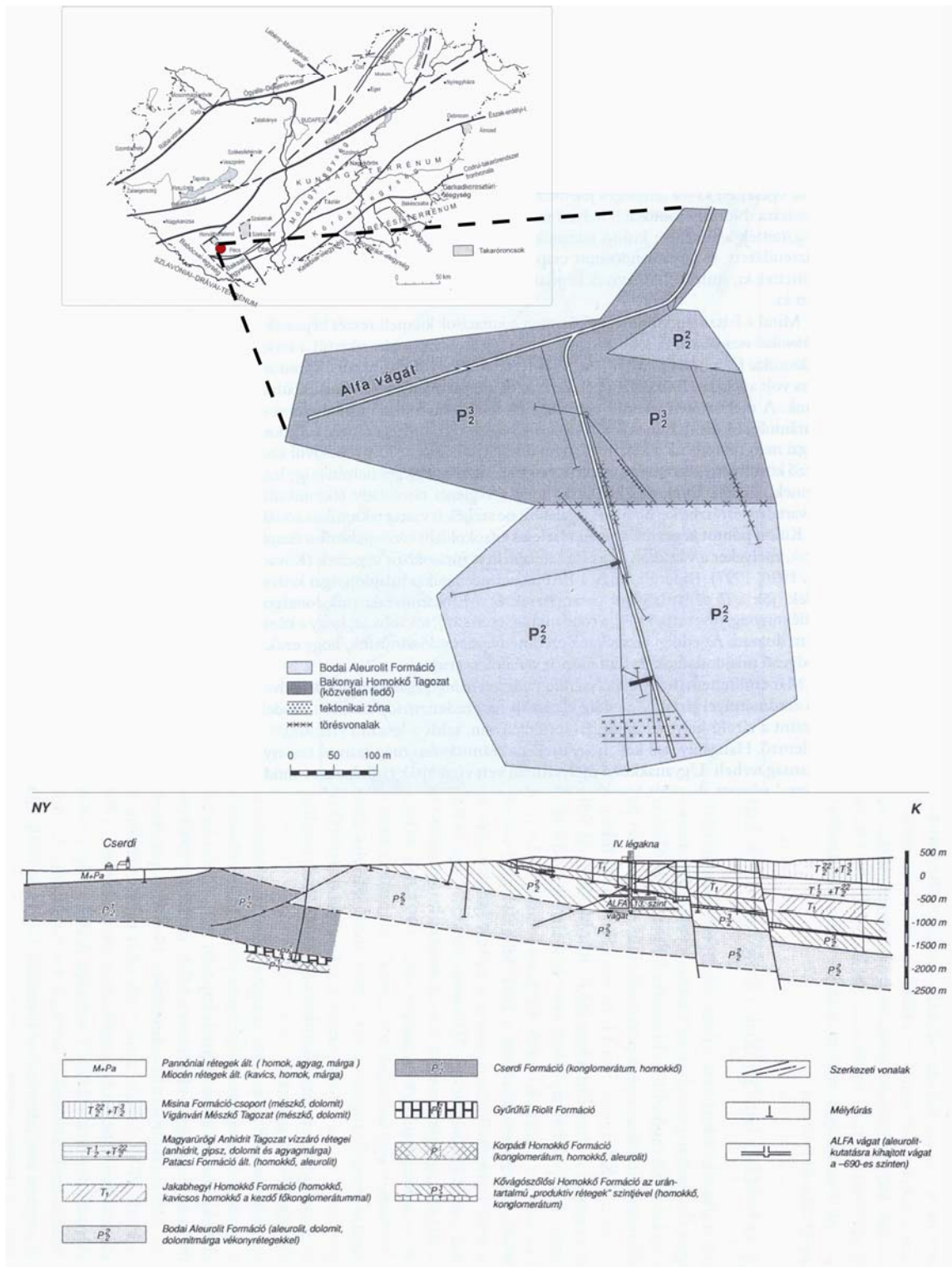
## 2. Földtani háttér

### 2.1. Tektonikai és rétegtani helyzet

A BAF a Nyugat-Mecsekben található és a Kárpát-Pannon térséget felépítő terrének közül a déli elhelyezkedésű Tiszai-egység részét képezi. A Tiszai-egység egy, az európai lemezről leszakadt litoszféra fragmentum, amely ma a Közép-Magyarországi vonaltól délre található (Fülöp et al., 1987) (1.ábra). A terrénium tektonikai fejlődése szempontjából fontos epizód a perm időszakban megkezdődött kontinentális riftesedés, amely a Neotethys-hez kapcsolódott, és amely már a korai szakaszban abortálódott. (A riftesedés végül csak a középső jura folyamán zajlott le.)

A BAF a permi üledékciklusban képződött és a Tiszai-egységen belül a Kunsági-terrénumon fejlődött ki, amely szerkezet-alakulási szempontból autochton tektonikai egységnek tekinthető (Kovács et al., 2000). A Kunsági-terrénum uralkodóan metamorf és magmás kristályos képződményekből áll, de kapcsolódnak hozzá karbon és perm korú üledékes kőzetek is. Legalsó litosztratigráfiai egysége a Korpádi Homokkő Formáció. Ez a molasz jellegű képződmény uralkodóan vörös színű, törmelékes homokkőből, konglomerátumból áll. Folyóvízi képződmény, amelyben ritkán szürkés színű, növénymaradványokat és spórákat tartalmazó rétegek is előfordulnak. Utóbbiak alapján sorolták be a formációt az alsó permbe (Barabás & Barabásné Stuhl, 1998). Fedőjében a Gyűrűfői Riolit Formáció található, amely egy, a kora-perm végén lezajlott kontinentális riftesedés terméke. Ennek fedője a Cserdi Konglomerátum, amely képződését tekintve medence peremi hordalékkúp, anyagát tekintve pedig vörösesbarna törmelékes kőzetváltozatokból álló, ciklikus felépítésű üledék, gyenge rétegzettséggel és rossz osztályozottsággal (Barabás & Barabásné Stuhl, 1998). A Cserdi Formáció fedőjében a Mecsek területén a BAF települ, amely legnagyobb vastagsága meghaladja az 1000 métert (Barabás & Barabásné Stuhl, 1998). A BAF nagyrészt vörös színű aleurolitból és albitos agyagkő váltakozásaiból áll, emellett tartalmazva még homokkövet, dolomitot és albitolitot (üledékes kőzet >50% albit tartalommal) is (Árkai et al., 2000). A formáció képződésekor szemiarid-arid éghajlat volt jellemző és az üledék lerakódása sekélyvízű sós tavi környezetben történt. Az oxidatív diagenetikus környezetet a BAF üledékének vörösesbarna színe tükrözi (Jámbor, 1964; Barabás & Barabásné Stuhl, 1998; Máthé, 1998; Árkai et al., 2000). Fedőjében helyezkedik el a permi üledéksorozat legfiatalabb tagja, a Kővágószőlősi Homokkő Formáció. Ez a folyóvízi eredetű formáció maximálisan 1400m vastagságú,

ciklikus felépítésű, és az alábbi négy tagozatra osztható: Bakonyai Homokkő (tarka megjelenésű), Kővágótöttösi Homokkő (szürke színű), Cserkúti Homokkő (vörös színű) és a Tótvári Homokkő (zöld színű). A Formáció kiemelt jelentőségét a reduktív fáciesű Kővágótöttösi Homokkő adja, a benne található, hosszú ideig bányászott uránércnek köszönhetően.



1. ábra. Az ALFA-1 vágat földrajzi elhelyezkedése és földtani környezete. A) A lelőhely (vörös, telt kör) Magyarország szerkezeti térképén (Kovács et al., 2000) és az ALFA vágat nyomvonala földtani térképén, Bárdossy (1999) alapján. B) Az ALFA vágat környezetének Ny-K irányú földtani szelvénye (Mecsekérc Környezetvédelmi Rt., 1997).

## **2.2.A Bodai Aleurolit Formáció kőzettani jellemzése**

A BAF-on elvégzett számos ásványtani vizsgálat (diffraktometria, vékonycsiszolat, DTA és termogravimetria, pásztázó elektronmikroszkópia, elektronmikroszkópia) eredményeképpen, és az ásvány-genetikai kutatások eredményei szerint a kőzetet alkotó ásványok 30-50%-a törmelékes eredetű, 40-60%-a diagenetikus fázis. Egyes területeken a kőzetek autigén albit tartalma meghaladja az 50%-ot, tehát az albitolit megnevezés alkalmazható rá (Árkai et al., 2000). Az albit fázis fehér vagy halvány rózsaszín színű, mérete  $\mu\text{m}$  - mm-es tartományban mozog, jellemzően szabálytalan alakú, fészkeket alkotó diszperz lencsék, szórt, kisméretű ásványok vagy cementáló fázis formájában jelenik meg. A kőzet jelentős másodlagos albit tartalma jellemzi a formáció típusos kifejlődését (Császár, 2005). A formáció egészének modális ásványtani összetétele a következő tartományban mozog:

- Plagioklász (főként albit): 25-65%,
- Kvarc: 5-35%,
- Kalcit, dolomit: 10-60%,
- Hematit: 2-12%,
- Agyagásványok: 5-50%.

A BAF aleurolitját alkotó agyagásványok csoportjába a következő ásványok tartoznak (mennyiségük szerint csökkenő sorrendben): illit-szericit, klorit, illit-klorit, illit-szmektit kevert rácsszerkezetek, és végül a kaolinit. A BAF felszíni és felszín közeli részein a mállás termékeként montmorillonit keletkezett (Bárdossy, 1999).

Az ásványtani vizsgálatok alapján a BAF repedéseit kalcit, dolomit, anhidrit, gipsz, albit, barit, cölesztin, kisebb mennyiségben kaolinit, pirit, kalkopirit és galenit töltik ki. Az ásványok kifejlődése és összetétele kishőmérsékletű, felszálló hidrotermákat valószínűsít (Csicsák, 1996). A K/Ar radiometrikus kormeghatározás szerint a repedéskitöltések kora  $80 \pm 3$  millió év (késő krétának felel meg), tehát jóval fiatalabbak, mint a BAF, amelynek keletkezését a késő permhez kötik (245-255 millió év) (Máthé, 2006).



### 3. A radioaktív hulladékok elhelyezése

A radioaktív hulladékok keletkezése több módon történhet: kutató- és oktatóreaktorban, orvosi és ipari, katonai tevékenység által. Ezek veszélyessége az élőlényekre eltérő, ezért különböző tárolási módokat igényelnek. A Nemzetközi Atomenergia Ügynökség a keletkezett radioaktív hulladékokat két osztályba sorolja:

1) Nagy-aktivitású hulladék (HLW): Hosszú élettartamú (több tízezer év),  $2 \text{ kW/m}^3$ -nél nagyobb hőteljesítményt létrehozó radioaktív nuklidokból álló hulladék, amelyek főként atomerőművekben kiégett fűtőelemeket és az azokat tartalmazó épület szerkezeti elemeit jelentik.

2) Kis- és közepes aktivitású hulladékok (LILW-MLW):  $2 \text{ kW/m}^3$ -nél kisebb hőteljesítményű hulladékok, ezen belül a felezési idő alapján két csoportot különböztetünk meg:

2A) Hosszú élettartamú hulladékok (LILW-LL): A 30 évnél hosszabb felezésidejű radioaktív izotópok koncentrációja  $400 \text{ Bq/g}$ -nál nagyobb,

2B) Rövid élettartamú hulladékok (LIL-SL): Felezési idejük 30 évnél rövidebb és  $400 \text{ Bq/g}$ -nál kisebb a radioaktív nuklidok koncentrációja.

A kis- és közepes aktivitású hulladékokat felszíni vagy felszín alatti (<200m) tárolókban lehet elhelyezni. Itt a kiégett fűtőelem 40-80 éven keresztül pihen. Ez alatt az idő alatt az aktivitásuk és a hőtermelésük is csökken. Ezután helyezik el a felszín alatti végleges tárolóban, 300-800m mélységben. Itt legalább 10 000 évig kell a veszélyes hulladékot a környezettől elszigetelni, miközben a lerakónak kétféle követelménynek kell eleget tennie (Bárdossy, 1999). A hulladék-tárolóknak az alábbi biztonsági korlátoknak kell megfelelnie:

- Dóziskorlát: A tárolás teljes időtartama alatt a helyi lakosság egyedeit maximum  $0,1 \text{ mSv/év}$  többlet-sugárterhelés érheti. (Hazánkban a radioaktív háttérsugárzás átlagosan  $2,4 \text{ mSv/év}$ ).
- Kockázati korlát: A tárolóból származó radioaktív sugárterhelés miatt a maradandó egészségkárosodás, illetve elhalálozás nem lehet  $10^{-5}/\text{évnél}$  nagyobb, vagyis évente 100 000 főre maximálisan egy eset juthat.

A radioaktív hulladékot ún. háromszoros gátrendszerrel különítik el a bioszférától, amely háromszoros gátrendszer az izotóp transzport folyamatokat hivatott megakadályozni:

- 1, Műszaki gátak: a hulladékot acélhordóban, konténerben helyezik el, amelyek olyan anyagból készülnek, amely a korrózióknak hosszú ideig ellenáll. Az újabb

technológiák szerint a radioaktív hulladékot kvarchomokkal keverik és üveggé olvasztják, így biztonságosabb az elhelyezés.

2, Bányaműszaki gátak: a vágatok és silók, és ezek falai jelentik a bányaműszaki gátakat.

A konténerek közötti teret és a vágatfalat izoláló anyaggal töltik ki pl. bentonit és zeolitok, amelyek jól megkötik a radioaktív izotópokat.

3, Földtani gátak: a hulladéktárolót befogadó földtani képződményeket jelentik. A radioaktív hulladék biztonságos elhelyezéséhez fontos ismerni a befogadó kőzet kőzettani, ásványtani, hidrogeológiai, geokémiai és izotópmegkötő tulajdonságait. Ezek kedvező tulajdonságai a radioaktív izotópok bioszférába való kiszabadulását akadályozzák meg.

A Magyarországon keletkezett kis- és közepes aktivitású hulladékok tárolását Bátapáti község közelében levő, gránitban épülő felszínalatti lerakóba helyezik el. A Pakson keletkezett nagyaktivitású hulladékokat, azaz a kiégett fűtőelemeket (évente 400-450 darab) az atomerőművek mellett épített átmeneti tárolókban helyezték el (KKÁT- Kiégett Kazetták Átmeneti Tárolója) (Bárdossy, 1995).

A biztonságos mérnöki tervezéshez fontos ismernünk a tároló kőzet talajvíz áramlási rendszerét, ennek redoxpotenciál és pH- értékét és a radioaktív nuklid megkötő képességet növelő ásványok (pl. agyagásványok, zeolitok, nagy fajlagos felületű ásványok) mennyiségét. A befogadó kőzet térségének kis szeizmicitással, aktív vulkáni működésnek illetve aktív törés zónák hiánya által jellemzett területnek kell lennie. Az ideális tároló kőzet legfontosabb jellemzői tehát, a minél kisebb vízáteresztő képesség, permeabilitás, fluidumokkal átjártság, amely alátámasztja a fluidumzárvány-kutatásnak mint a tároló kőzet jellemzési eszközének jelentőségét (Bárdossy, 1995).

## 4.A fluidumzárványok vizsgálatának közettani jelentősége

### 4.1.A fluidumzárvány vizsgálatok alapjai

Dolgozatomban karbonátos-baritos erek fluidumzárványainak vizsgálatával foglalkozom. A vizsgálatok célja a hidrotermális ereket alkotó ásványok (barit, karbonát) képződési körülményeinek és ezen ásványokat létrehozó fluidumok pontosabb megismerése, valamint a kőzet-fluidum kölcsönhatások nyomainak felderítése.

A fluidumzárvány kutatások alapjai Edwin Roedder nevéhez fűződnek, aki fluidumzárványnak nevezi az ásvány képződése, valamint az utólagos folyamatok során csapdázódott fluidum állapotban lévő (gáz, gőz, folyadék) zárványokat (Roedder, 1984). Kutatásai szerint az egyes ásványfázisok fluidumzárványai információt hordoznak a kristályosodás, vagy a kristályosodást követő állapotok (p-T-x) körülményeiről, attól függően, hogy a gazdaásvány keletkezéséhez képest mikor csapdázódtak.

A fluidumzárványok petrográfiai leírásokat Roedder (1984), valamint van den Kerkhoff és Hein (2001) munkája nyomán végeztem.

A fluidumzárványokat keletkezésük szerint kettő csoportra osztjuk. Az egyik csoportba tartoznak az ún. *elsődleges (primer)* fluidumzárványok, amelyek a befogadó ásvány kristályosodásával egy időben estek csapdába. Ezek legtöbbször véletlenszerűen helyezkednek el, vagy növekedési zónákkal párhuzamosan.

Az elsődleges fluidumzárványok egy másik csoportját képviselik az *álmásodlagos* (vagy pszeudoszekunder) fluidumzárványok, amely keletkezésüket tekintve elsődlegesek, de megjelenésükben a másodlagos zárványokra hasonlítanak. Ezek a zárványok síkok (egykori beforrt repedések) mentén jelennek meg, de a repedés nem metsz szemcsehatárt. A fluidumzárványok másik csoportjába a *másodlagos (szekunder)* fluidumzárványok tartoznak, amelyek csapdázódása a befogadó ásvány kristályosodása után zajlott le. Másodlagos fluidumzárványok akkor keletkeznek, ha egy ásvány stressz hatására megreped és a repedésekbe a fluidum jut be. A repedés a nyomás- és hőmérsékletváltozás hatására beforrhat, és az így csapdázódott zárványokból ún. másodlagos fluidumzárvány csoport alakul ki. Az elsődleges fluidumzárványokkal ellentétben utóbbiak sorokban – síkok mentén - jelennek meg és átszelhetnek növekedési zónákat, szemcsehatárokat is.

A fluidumzárványok alakja utalhat a zárványok relatív korára, mert az alakjuk megmutatja, hogy mennyi idő állt rendelkezésre ahhoz, hogy a zárvány felvegye a számára legideálisabb,

azaz a legkisebb szabadenergiát biztosító formát. Az ún. „érett” fluidumzárványok megfelelő mennyiségű időt töltöttek a befogadó ásványban adott p-T-x körülmények között ahhoz, hogy formájuk negatív-kristály alakot vegyen fel. Az „éretlen” fluidumzárványok alakja ezzel ellentétben szabálytalan, amőbaszerű, mert nem állt rendelkezésre elég idő a zárvány számára felvenni az ideális energetikai körülményeknek megfelelő alakot.

A fluidumzárvány vizsgálatok alapjául a zárványban található minimum két vagy több fázis átalakulási folyamatainak megfigyelése szolgál. A vizsgálatokhoz szükséges feltételezés, hogy a bezáródás után a zárvány térfogata nem változik, abból anyag nem távozik el és nem adódik hozzá. A mért hőmérsékleti értékek alapján következtethetünk a zárványok kémiai összetételére és a minimum csapdázódási hőmérsékletre, ami alapján a befogadó ásványt kristályosító fluidum összetételére illetve hőmérsékletére is következtethetünk, azaz a bezáródási körülményekre nyerhetünk információt. A szükséges hőmérsékleti értékeket, amelyekből ezeket az adatokat kiszámolhatjuk, mikrotermometriai mérések során kapjuk meg, amely mérés fűthető-hűthető tárgyasztalú mikroszkóppal történik.

A zárványok összetételének meghatározása az olvadás során megfigyelhető fázisátalakuláson alapul. A csapdázódási nyomás és hőmérséklet becslésére a melegítés hatására bekövetkező homogenizációs hőmérsékleti adatokat használhatjuk fel. A két adatot felhasználva, kiszámítható a fluidum moláris térfogata, illetve a sűrűség.

A földkéregben megjelenő leggyakoribb fluidrendszerek a H<sub>2</sub>O–NaCl és a H<sub>2</sub>O rendszerrel közelíthetők. Vizes sóoldatok esetében, az olvadási hőmérsékletből (eutektikus hőmérséklet illetve utolsó olvadás) megállapítható a fluidum szalinitása, valamint az oldott anyag minősége. Számos kísérleti adattal rendelkezünk adott összetételű fluidumok eutektikus olvadási hőmérsékletéről. Az eutektikus hőmérséklet (melegítés során az „első olvadás” hőmérséklete) az oldott só minőségétől függ, tehát segítségével meghatározható a fluidumzárvány kvalitatív összetétele. Ismert összetételű sós oldat szalinitását a fagyáspont csökkenés és az oldott só koncentrációjának összefüggését leíró empirikus egyenlettel tudjuk meghatározni (Bodnar 1993):

$$\text{NaCl}_{\text{ekv}} \text{ szalinitás (m/m\%)} = \theta + 1,78 \theta - 0,0442 \theta^2 + 0,000557 \theta^3,$$

ahol  $\theta$  a fagyáspont csökkenést jelöli. Az egyenlet a minimum  $-21,2^\circ\text{C}$  olvadáspontú, maximum 23,2 m/m% NaCl<sub>ekv</sub> szalinitású fluidumzárványokra alkalmazható.



Szobahőmérsékleten kétfázisú, vizes sós oldatot tartalmazó fluidumzárványt melegítéssel homogenizálhatunk. A melegítés során a rendszer előbb a forráspontgörbén mozdul el vagy a következő három mód egyike szerint válik egy fázisúvá:

- 1) Folyadék fázisú homogenizáció: gázfázis (buborék) fokozatosan zsugorodik, majd eltűnik,
- 2) Gáz fázisú homogenizáció: a gáz fázis növekszik, majd kitölti a teljes zárványt,
- 3) Kritikus homogenizáció: a folyadék és gáz fázis közötti határ elhalványul, majd a sűrűség és megszűnése miatt a határ megszűnik.

A homogenizációs hőmérséklet kijelöl egy, a forráspont görbéből kiinduló, a P-T mezőben adott rendszerre állandó térfogattal és így állandó sűrűséggel jellemző pontokat összekötő vonalat (izochort), amely mentén a zárvány anyaga „valahol” a hőmérséklet-nyomás mezőben csapdázódott.

A fluidumzárvány kutatásban fontos szerepe van a zárványt alkotó fázisok jellemzésének, illetve a fázisarányok meghatározásának. Utóbbi esetben azonban érdemes figyelembe venni azt a tényt, hogy a vékonycsiszolatban csak egy metszetet látunk, ezért a fázisarányokat sokszor csak megközelítőleg tudjuk meghatározni.



## 5. Vizsgálati módszerek

A repedéskitöltő ásványok vizsgálatát a minták előkészítése előzte meg. Először kiválasztottam a legnagyobb barit- és karbonát-tartalmú repedéskitöltéseket tartalmazó mintákat, majd ezekből vékonycsiszolatot készítettem az Eötvös Loránd Tudományegyetem Kőzettani és Geokémiai Tanszék mikrotechnikai laboratóriumában. A mindkét oldalán 1µm-es gyémántpasztával polírozott minták vastagsága 120-150µm.

A petrográfiai vizsgálatokat a Litoszféra Fluidum Kutató Laboratóriumban Nikon Eclipse LV100 POL típusú polarizációs mikroszkóp alatt 7 db. vékonycsiszolaton végeztem el. A vékonycsiszolatokról készült fotók, a polarizációs mikroszkópokra szerelt Nikon CoolPIX E950 típusú és Nikon CoolPIX 4500 típusú digitális fényképezőgépekkel készültek.

Az egyéni fluidumzárványokban lejátszódó fázisátalakulásokat Nikon Eclipse E600Pol típusú mikroszkópra szerelt, LINKAM típusú, gázáramoltatású hűthető-fűthető tárgyasztalon végeztem el, az ELTE Kőzettani és Geokémiai Tanszékének Litoszféra Fluidum Kutató Laboratóriumában. A fagyasztás folyékony nitrogénen átáramoltatott N<sub>2</sub> gázzal, a fűtés elektromos vezérlésű fűtőszállal történt. A műszer termométerét tiszta standard CO<sub>2</sub> zárvány fagyáspontján kalibráltam. A fagyáspont meghatározásához a zárványokat -100°C fokra hűtöttem, majd lassan (5°C/perc) melegítettem, míg a rendszer el nem érte az eutektikus („első”) az olvadáspontját. A teljes felolvadás hőmérsékletének (amely a fluidum fagyáspontnak feleltethető meg) elérését követően a zárványt tovább melegítve homogenizáljuk.

## 6.Eredmények

### 6.1.Petrográfiai vizsgálatok

**ALFA-1 vágat, 444,0 - 445,5m**

*Kőzetnév: Erkitöltő karbonát*

#### Makroszkópos vizsgálat:

A vizsgált minta az aleurolitban megjelenő 4,5-5,0 cm vastagságú karbonát ér. Az aleurolit falkőzetben dolomitos-albitos fészkek jelennek meg, amelyek mérete átlagosan 1mm. A karbonát eret durvakristályos, fehér – és halványrózsaszín karbonát alkotja, amelyben 1- 2mm hosszú üregek találhatók.

#### Mikroszkópos vizsgálat:

Az áteső fényben szürkés fehér színű karbonát szemcsék tömeges megjelenésűek. A kristályok hipidiomorf-xenomorf kifejlődésűek. A kalcit és a dolomit mikroszkópos megjelenésük alapján nehezen elkülöníthető. A kristályokon mechanikai ikresedés nyomai láthatók. Jól látható hasadási lapokkal rendelkeznek, méretük átlagosan 4-5mm. Sok opak zárványt tartalmaznak, amelyek mérete 3-10µm között változik. Növekedési zónákat nem figyeltem meg a karbonáton. A tömegesen elhelyezkedő szemcsék között 1-2mm nagyságú szögletes, sötét színű aleurolit törmelékek vannak.

#### Fluidumzárvány petrográfia:

Az erkitöltő karbonátban található fluidumzárványok az egyes karbonát szemcsékben elszórtan, magányosan helyezkednek. A mintában megjelennek szobahőmérsékleten egy- és kétfázisú fluidumzárványok is. Az egyfázisú fluidumzárványok felhőszerűen, a kétfázisú zárványok magányosan helyezkednek el. Az egy fázisúak mérete kb. 2-3µm, a kétfázisú zárványok mérete maximum 7-8µm, a gáz fázis aránya a folyadékhoz képest 20-25tf%. A fluidumzárványok elsődleges megjelenésűek, alakjuk szögletes-szabálytalan, általában nem mutatnak negatív kristály alakot. Másodlagos megjelenésű fluidumzárványokat nem találtam.

**ALFA-1 vágat, 433,0 – 434,0m**

*Kőzetnév: Baritos-karbonátos érkitöltés aleurolitban*

*Makroszkópos vizsgálat:*

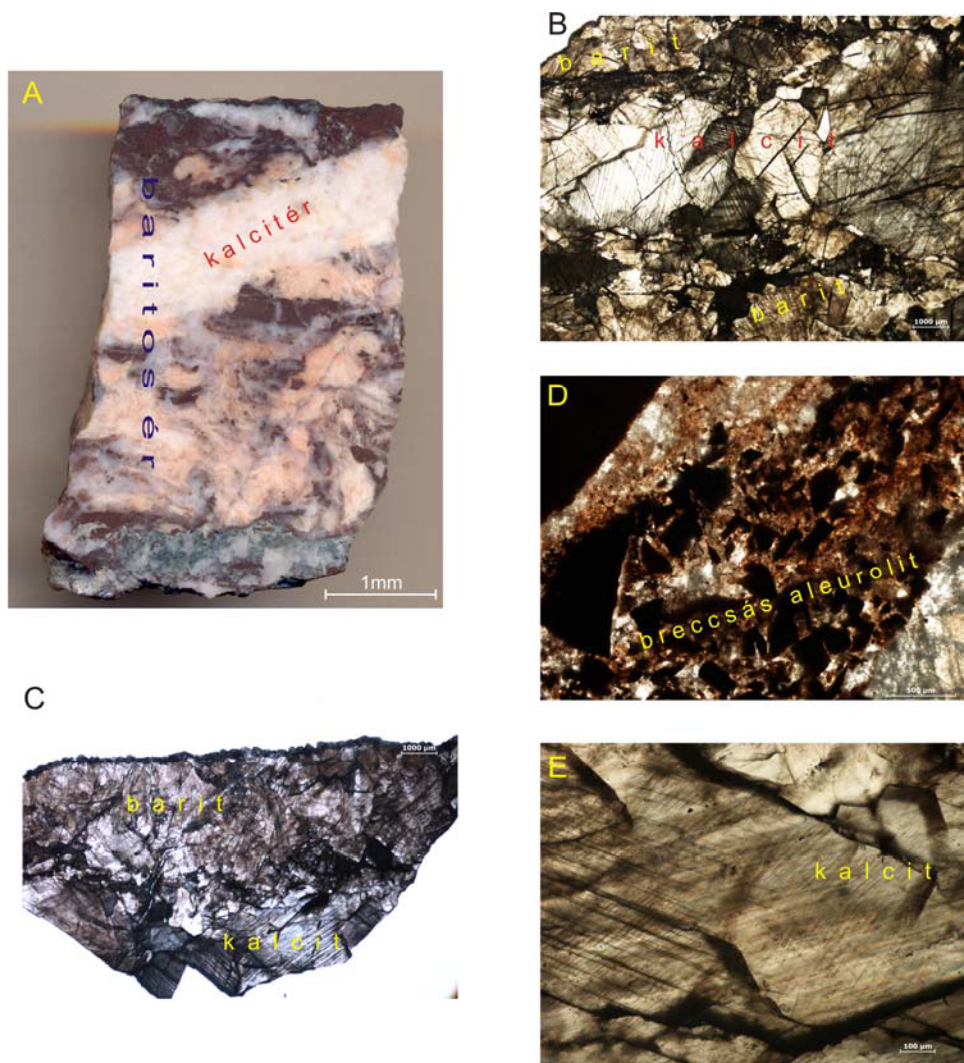
A vizsgált minta a repedésben elhelyezkedő baritos és karbonátos kitöltés. A minta kb. 30tf% mennyiségben tartalmaz aleurolit breccsát. A barit durvakristályos, breccsa jellegű. A világos-rózsaszín barit nagyobb mennyiségben megtalálható a kőzetben (kb. 40tf%), mint a fehér színű karbonát. A baritot átszelő karbonát erek vastagsága 0,5-1cm (2A ábra). A kőzetminta különlegessége, hogy a baritos és karbonátos érkitöltés kis mennyiségben (3-4tf%) szürkés-zöld kloritot tartalmaz.

*Mikroszkópos vizsgálat:*

A hússzínű barit szemcsék 7-8mm nagyságúak, folt-szerű aggregátumokban jelennek meg tömegesen. A szemcsék nem rendelkeznek éles határral (2B és C ábra). Az aleurolit falközettel való érintkezésnél a mintára breccsás szövet jellemző (2D ábra). A lemezes szerkezetű fehér karbonát szemcsékben a hasadási irányok jól láthatók, a kristályok többségében sajátalakúak. A kalcit és a dolomit mikroszkópos megjelenése hasonló, elkülönítésük nehézkes. Méretük 5-6mm (2E ábra). Az opak zárványok elszórva jelennek meg a karbonátokban. Méretük 3-10 $\mu$ m. A karbonátokban növekedési zónásság figyelhető meg. A zónáhatárokat az azok mentén rendeződő nagymennyiségű fluidumzárvány jelenléte emeli ki. Egyes esetekben a karbonát egészen barnásvörös színű lehet a nagymennyiségű opak zárványtól és a sűrű növekedési zóna menti zárványosságtól (3A ábra).

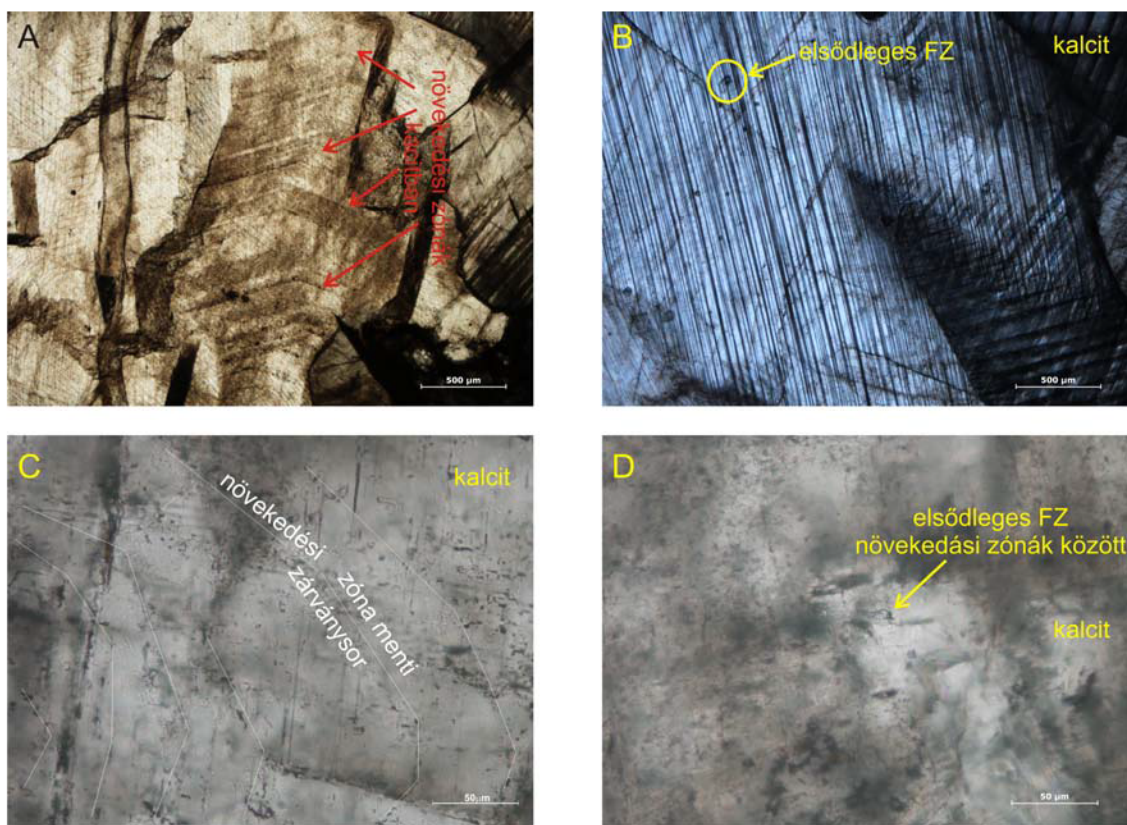
*Fluidumzárvány petrográfia:*

Nagymennyiségű fluidumzárvány található a baritban és a durvakristályos karbonátban is. A karbonátban lévő elsődleges zárványok megjelennek növekedési zónákat követve (3A és C ábra), valamint szórványos elhelyezkedéssel (3B ábra) is. Utóbbi jellemző a baritban az elsődleges fluidumzárványaira is. A baritban elsődleges csapdázódásúnak kinéző, magányos zárványok szobahőmérsékleten egyfázisúak, méretük 2-3 $\mu$ m, alakjuk szabálytalan. A karbonát érben található zárványok mérete 4-5 $\mu$ m, ezek alakja amöboid. Található köztük szobahőmérsékleten kétfázisú zárvány is, 25-30tf% gáz és folyadék aránnyal (3B és D ábra). A karbonát szemcse tartalmazott másodlagos fluidumzárványt, amelyek egy sík mentén helyezkednek el, 1-2 $\mu$ m-es nagyságúak, egyfázisúnak tűnnek és gömbölyded alakúak.



2. ábra. Az ALFA1 vágatból származó 433,0-434,0m minta megjelenése. A) Makrószkopos felvétel baritos eret harántoló karbonátos érről. B) Baritos eret harántoló kalcitér mikroszkópos képe (1N, áteső fény). C) Baritos és kalcitos erek kontaktusának mikroszkópos képe (1N, áteső fény). D) Aleurolit törmelékét (sötétebb mező) tartalmazó telérek (világos mező) mikroszkópos képe (1N, áteső fény). E) Sűrű hasadási nyomvonalakkal szabdaló érkítő kalcit kristályok mikroszkópos képe (1N, áteső fény).





3. ábra. Az ALFA1 vágatból származó 433,0-434,0m minta érkitöltő karbonát ásványainak és fluidumzárványainak mikroszkópos felvételei (1N, áteső fény). A) Nővekedési zónásság kalcit kristályban. B) Elsődleges megjelenésű fluidumzárvány sűrű hasadási vonalakkal harántolt kalcitban. C) Nővekedési zónák menti elsődleges megjelenésű fluidumzárvány sorok kalcit gazdaásványban (a fehér segédvonalak a nővekedési zónákat emelik ki). D) Kalcit nővekedési zónában elhelyezkedő, elsődleges megjelenésű, kétfázisú fluidumzárvány (FZ – fluidumzárvány).

**ALFA-1 vágat, 2. Ny-i kamra: 12,0 – 12,5m**

*Kőzetnév: Karbonát és barit erek aleurolitban*

*Makroszkópos vizsgálat:*

A kőzet vörös színű jó megtartású aleurolit, amelyben a repedések karbonátot és baritot egyaránt tartalmaznak. Az aleurolitot kisebb, kb. 1mm-es vastagságú karbonát és barit erek szelik át párhuzamosan elhelyezkedve. A kőzetet átszelő 1-2cm vastagságú karbonátos és baritos kitöltésű repedés adja a minta fő tömegét, kb. 60tf%-át. Ebben a nagyobb érben nincs éles határvonal, az aleurolit fokozatosan, breccsás szövettel érintkezik a kalcit és barit érrel.



### Mikroszkópos vizsgálat:

A 6-7mm-es karbonát kristályok hasadási nyomvonalai határozottan jelennek meg. A kalcit és a dolomit megjelenése megegyező, mikroszkópban nehezen különíthetők el egymástól. A minta erősen töredezett, a karbonátokon ezen felül mechanikai ikresedés nyomai láthatók. Egyes karbonát szemcsék kioltása rendellenes, unduláló. A halvány hússzínű, rózsaszínű barit szemcsék mérete maximálisan 4mm, megjelenése szabálytalan, tömeges, elmosódott szemcsehatárokkal. Opak zárványok a karbonát és barit fázisokban egyaránt előfordulnak, méretük 3-10 $\mu$ m, színük fekete, vöröses-fekete.

### Fluidumzárvány petrográfia:

A karbonát kristályok, amelyekben a hasadási lapok jól láthatók, nem tartalmaznak fluidumzárványt. A csekély mennyiségű szobahőmérsékleten kétfázisú fluidumzárványokat baritban találhatók meg; ezek elszórt megjelenésű, maximum 3-4 $\mu$ m nagyságú, szögletes alakú zárványok, amelyben a gáz és folyadék fázisaránya 14-20tf%. Másodlagos megjelenésű fluidumzárványt nem találtam.

### **ALFA-1 vágat, 443m**

*Kőzetnév: Baritos repedéskitöltés aleurolitban*

### Makroszkópos vizsgálat:

Az aleurolit kőzetmintát nagymennyiségű, szabálytalanul elhelyezkedő repedések szelik át. Kétféle repedés van a kőzetben: a 2-3mm-es ereket karbonát tölti ki, még a nagyobb repedést (4-5cm) karbonát és barit vegyesen. A világos-rózsaszínű barit kitöltések aránya a sötét és fehér karbonáthoz képest 1:3. A barit kristályok kb. 1cm szélességben jelennek meg.

### Mikroszkópos vizsgálat:

Az aleurolit, karbonát és barit egyaránt töredezett, a falkőzet és az ér határa breccás szöveti képet mutat. A szilánkosan törő aleurolit elszórtan helyezkedik el a karbonát és barit kristályok között. Az aleurolit töredékek mérete széles skálán változik (4 $\mu$ m-10mm). A karbonát szemcsék alakja szögletes, de nem sajátalakú. Maximális méretük 2-3mm. Növekedési zónákat nem figyeltem meg a szemcséken. A barit elmosódott szélű, lekerekített alakú szemcsékként van jelen, méretük harmada, negyede a karbonát szemcsék méretének. A mintában sok, apró, 3-5 $\mu$ m méretű opak zárvány van, amelyek elszórtan jelennek meg.

### Fluidumzárvány petrográfia:

A fluidumzárványok a befogadó ásvány (barit és karbonát) összes feltárt szemcséjében megtalálhatók, megjelenésük hasonló. A zárványok véletlenszerűen helyezkednek el, elsődleges megjelenésűek, gömbölyded alakúak és szobahőmérsékleten egyfázisúak. Méretük kb. 1-2 $\mu$ m.

### **6.2. Mikrotermometriai vizsgálatok eredménye:**

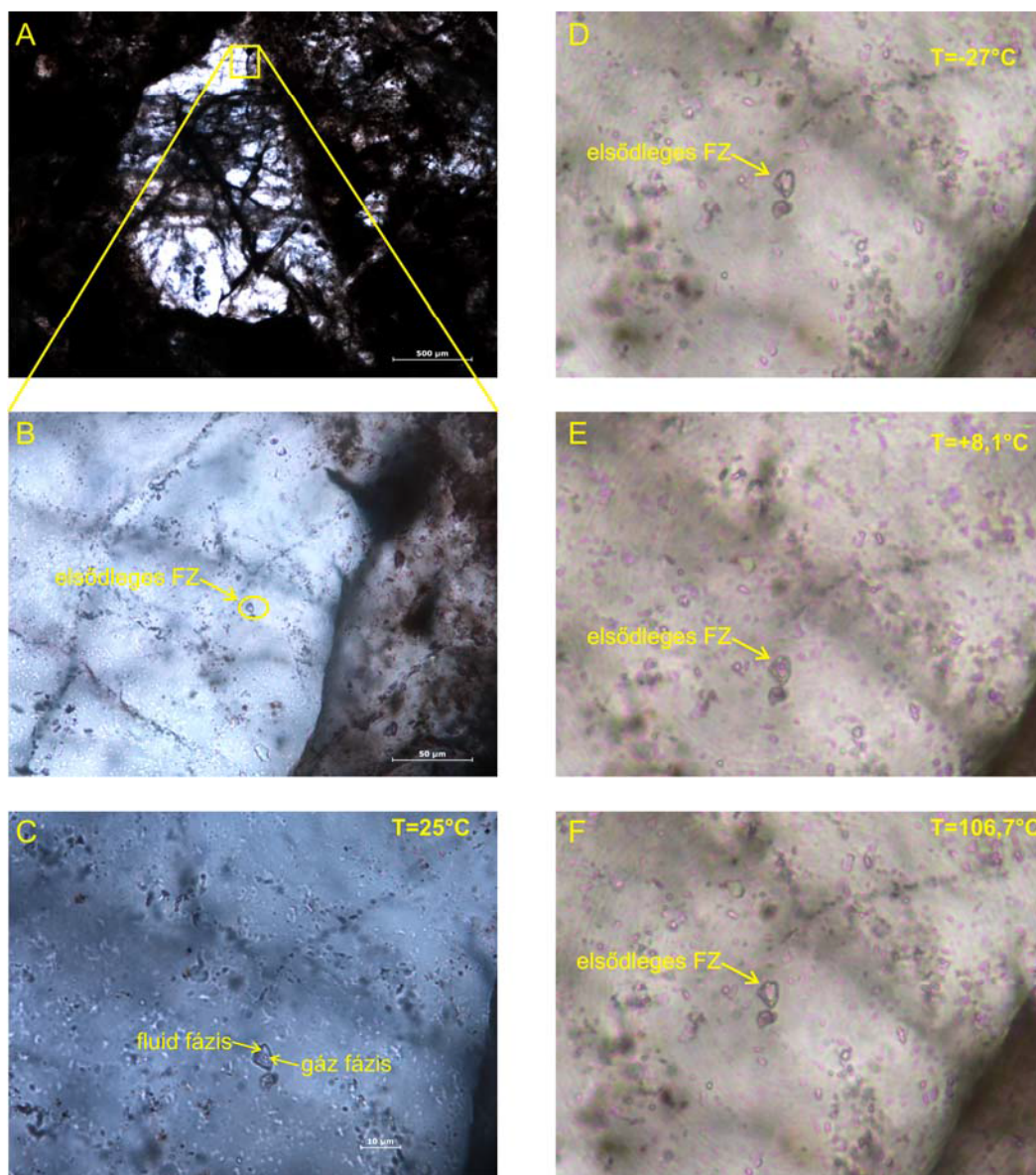
A mikrotermometriai méréseket elsődleges megjelenésű, szobahőmérsékleten kétfázisú fluidumzárványokon végeztem az ALFA-1 vágatból származó mintákban. A fluidumzárványok kis mérete (átlagosan 3-4 $\mu$ m) sok esetben megnehezítette a fázisátalakulások megfigyelését. A négy mintából kettőben (ALFA-1, 444,0–445,5m, ALFA-1, 433,0–434,0m) találtam a mérés megfigyeléséhez szükséges nagyságú (legalább 7-8 $\mu$ m) fluidumzárványt (4A, B és C ábra).

A mérések két részből álltak, az első folyamat során a mintákat lefagyasztottam  $\sim$ 100 °C-ra, ahol tartottam a hőmérsékletet 1 percig. Ezután 10°C/perc sebességgel melegíteni kezdtem a zárványt -50°C-ra, miközben figyeltem, hogy a zárványban mikor jelenik meg az első szilárd + fluid fázisegyüttest (4D ábra). Az első olvadék megjelenése közel van a fluidumot alkotó komponensek együttesét leíró kémiai rendszer eutektikus hőmérsékletéhez ( $T_{eut}$ ), ami esetünkben -21,6 és -22,3°C közé esett (1. táblázat), ami az ismert rendszerek közül a NaCl-H<sub>2</sub>O -21,2°C-os eutektikus hőmérsékletéhez esett a legközelebb. További melegítés hatására (azonos ráta mellett) megmértem az utolsó szilárd fázis olvadás hőmérsékletét ( $T_{olv}$ ) (1 táblázat). Az utolsó olvadás -1,2 és -1,7°C közé esett. A  $T_{olv}$  ismeretében megbecsültem a só koncentrációt (szalinitás, tömeg%) Bodnar (1993) módszerével:

$$NaCl_{ekv} \text{ szalinitás (m/m\%)} = \theta + 1,78 \theta - 0,0442 \theta^2 + 0,000557 \theta^3.$$

Az egyenlet alapján a fluidum 3,2 és 4,3 m/m% NaCl-ot tartalmaz, számolás pontos eredményeit a 2. táblázat mutatja.

A zárványokat tovább melegítve (4E ábra) a homogenizációs hőmérsékleti értéket ( $T_h$ ) elérve 105,3-106,8 °C között (1. táblázat) minden fluidumzárvány homogenizálódott (4F ábra).



4. ábra. Érkítőltő kalcitban csapdázódott fluidumzárvány különböző hőmérsékleten, mikroszkópos felvételen (1N, áteső fény). A) Kalcit befogadó ásvány, amelyben primer megjelenésű, kétfázisú fluidumzárványt mértem. B) Fluidumzárvány elhelyezkedése a befogadó ásványfázison belül. C-F) Fluidumzárvány viselkedése különböző hőmérsékleteken ahűtési és fűtési kísérletek során. C: kétfázisú fluidumzárvány szobahőmérsékleten, D: megfagyott fluidumzárvány  $-27^{\circ}\text{C}$ -on, E: kétfázisú fluidumzárvány  $8^{\circ}\text{C}$ -on, F: fluidumzárvány a teljes homogenizációt követően  $107^{\circ}\text{C}$ -on (FZ – fluidumzárvány). A D, E és F képek ugyanazzal a nagyítással készültek, mint a C kép.

1. táblázat. Fluidmzárványok mikrotermomeriai mérések eredményei. Rövidítések:  $T_{eut}$  = eutektikus hőmérséklet,  $T_{olv}$  = oladási hőmérséklet,  $T_h$  = homogenizációs hőmérséklet,  $tf\%$  = térfogat%

minta/zárvány	befogadóásvány	becsült gáz	T <sub>eut</sub>	T <sub>olv</sub>	T <sub>h</sub>
		aránya ( tf %) a teljes zárványhoz képest			
ALFA-1 444,0-445,5					
1.	kalcit1	30	-21,6	-1,6	-
2.	kalcit	40	-22,2	-1,5	-
3.	kalcit	20	-21,9	-1,4	-
4.	kalcit	15	-21,9	-1,7	-
5.	kalcit	20	-22	-1,2	-
1.	kalcit2	10	-22,3	-1,3	106,8
ALFA-1 433,0-434,0					
1.	kalcit	10	-21,8	-1,6	105,3

2. táblázat. A tanulmányozott fluidumzárványok Bodnár (1993) egyenlete alapján számolt szalinitási értékei ekvivalens NaClm/m%-ban

minta/zárvány	szalinitás
<i>ALFA-1 444,0-445,5</i>	
1.	4,563
2.	4,271
3.	3,980
4.	4,856
5.	3,401
1.	3,690
<i>ALFA-1 433,0-434,0</i>	
1.	4,563



## 7. Diszkusszió

A munkám célja, hogy petrográfia és fluidumzárvány kutatás eszközeit felhasználva meghatározzam azokat a körülményeket, amelyek a BAF repedéskitöltő ásványainak képződését jellemzik, illetve, hogy információt gyűjtsék a kőzet és fluidumok közötti későbbi kölcsönhatásokról. A BAF képződése után lejátszódott folyamatok jellegének megismerésével szeretnék hozzájárulni a formációnak, mint potenciális radioaktív hulladéktároló egységnek az értékeléséhez.

A kőzetet ért tektonikai hatások miatt felnyílt repedéseket hidrotermális telérekre jellemző ásványtársulások töltik ki. A telérek között megfigyelhetők karbonátos és baritban gazdag erek. Petrográfiai megfigyelésekre alapozva megállapítható, hogy a baritos erek feltehetőleg idősebbek a karbonátos ereknél, de legalább egykorúak azokkal.

Ennek bizonyítékeként értelmeztem, hogy a karbonátos erek a vizsgált mintában keresztezik a barit tartalmúakat, azonban ez a geometriai kapcsolat fordítva már nem látható. Karbonátos és baritos erek megjelennek egy kőzetben egymással hozzávetőlegesen párhuzamosan, illetve esetenként a két ásvány megjelenik egy teléren belül.

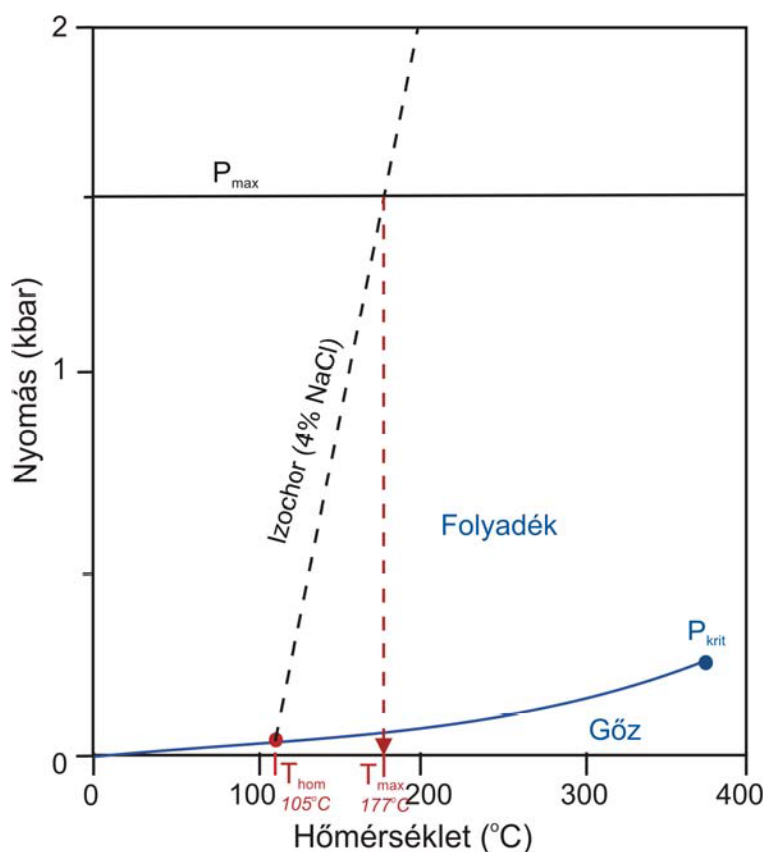
A fluidumzárvány petrográfiai vizsgálatok során több fluidumzárvány együttest tudtam elkülöníteni. A mintákban több, elsődleges – azaz a repedéskitöltő ásványok képződése során csapdázódott - fluidumzárvány generáció ismerhető fel növekedési zónák mentén, illetve a befogadó ásványokban magányosan és véletlenszerűen elrendeződve. Ebből arra következtetek, hogy a repedéskitöltő ásványok szakaszosan érkező oldatokból válhattak ki.

Az általam vizsgált viszonylag nagyméretű (7-8 $\mu$ m), szabálytalan alakú fluidumzárványok (4 ábra: A-F képek), a kalcitok különböző növekedési zónáiban (3A és C ábra) – azaz más-más fluidumzárvány együttesekben - találhatók, ennek ellenére a mikrotermometriás mérések (eutektikus olvadási hőmérsékletek) alapján egyöntetűen a H<sub>2</sub>O-NaCl rendszerrel közelíthetők. A zárványok nagyon szűk tartományba eső „utolsó olvadási hőmérsékleteiből” - azaz a fagyáspontjaiból - számolt (Bodnar, 1993), 3,2 és 4,3 % közötti szalinitás értékek (2. táblázat) arra utalnak, hogy a fluidum jellege nem változott a karbonátkristályok növekedése során.

A szobahőmérsékleten kétfázisú, kalcitban csapdázódott fluidumzárványok 105,3 és 106,8°C között homogenizálódtak. Ebből és mért olvadási hőmérsékletből kiszámolható a gazdaásványok képződési tartománya, amelyet a H<sub>2</sub>O fázisdiagramján ábrázoltam (5. ábra).



Az ábrán feltüntettem azt az izochort, amely a mért szalinitású fluidumzárványok esetében, a 105°C homogenizációs hőmérsékletéhez tartozik (Bodnar és Vytik, 1994) és, amely utal azokra a P-T viszonyokra, amelyek alatt a fluidum csapdázódása megtörténhetett. A lehetséges fluid bezáródás nyomását a BAF rétegtani és tektonikai helyzet alapján legfeljebb 1,5 kbar-ra becsültem. Az izochor és a becsült maximális képződési nyomás metszéspontjának a hőmérséklet tengelyre való vetítésével kapott érték alapján következtethetünk arra, hogy a fluidumzárvány bezáródásakor a kőzetet átjáró hidrotermális vizek hőmérséklete 105 és 177°C között volt. A kristályosító fluidum tehát a mikrotermometriás vizsgálat alapján felhígult hidrotermás vizes sóoldat lehetett.



5. ábra A H<sub>2</sub>O vázlatos fázisdiagramja. A diagramon az x-tengelyen a hőmérsékletet tüntettem föl °C-ban, az y-tengelyen a nyomást kbar-ban. A kék vonal a H<sub>2</sub>O fázisdiagramjából a folyadék és gőz fázisokat elválasztó forráspontgörbe. A görbe nagyobb hőmérsékletű végén kék pont ( $P_{krit}$ ) jelzi a kritikus pontot, amely fölött a fluidum szuperkritikus állapotú. A homogenizációs hőmérsékleti értékeket vörös színű pont jelzi ( $T=105^{\circ}\text{C}$ ). Az ebből a hőmérsékleti pontból vetített a fekete szaggatott egyenes jelzi a 4% átlagos NaCl szalinitású, 105°C homogenizációs hőmérséklettel jellemzett izochort (Bodnar és Vytik, 1994 alapján). A becsült maximális nyomást jelző egyenes (1,5 kbar,  $P_{max}$ ) és az izochor metszéspontjának az x tengelyre való merőleges vetülete adja meg a fluidumzárványok maximális potenciális képződési hőmérsékletét.

A baritban nem találtam mérhető fluidumzárványt (kis méretük miatt) azonban, a fent tárgyalt petrográfiai megfigyelések és a fluidumzárványok nagyobb érettségi fokra utaló negatív kristály alakja alapján megállapítható, hogy ezek az ásványok egy régebbi fluidumot csapdáztak. A barit korábbi keletkezését geokémiai megfontolások is alátámasztják. A barit ( $\text{BaSO}_4$ ) geokémiai tulajdonságai közé tartozik, hogy a Ba és szulfát tartalmú hűlő oldatban hamar túltelítődik, közepesen nagy hidrotermás hőmérsékleteken is stabil fázist képez, tehát nem oldódik könnyen vissza a hidrotermális oldatokba. Ellentétben a karbonáttal, ami a szakaszos hidrotermás fluidum betörések során több lépcsőben is kiválhat (illetve vissza is oldódhat), mint az látható a növekedési zónák és leállási felületek esetében.

A mintákban, begyógyult törés-síkok mentén elhelyezkedő másodlagos zárvány együttesek is megfigyelhetők. Ez azt jelzi, hogy a törések legalább egyszer felújultak és a kőzet képződése után is kölcsönhatásba lépett fluidumokkal. Mivel a zárványok egy része egyfázisú és annyira kis mérettel rendelkezik, hogy nem voltak alkalmasak mérési megfigyelésekre, így az összetételüket nem ismerjük.

A fluidumzárványok apró mérete és a kőzet ásványaihoz viszonyított kis térfogatarányuk alapján feltételezhető, hogy a kőzet-fluidum kölcsönhatások nem eredményezték a kőzetben gyengeségi zónák keletkezését. A hidrotermális kitöltésű törések és repedések teljes mértékben összeforrtak; így a BAF a vizsgált részében kompakt kőzetként jellemezhető.

A repedéseket kitöltő ásványok genetikájuk alapján esetlegesen beilleszthetők nagyobb léptékű geodinamikai összefüggésekbe. A telérek képződését K/Ar kormeghatározás alapján a felső kréta korba helyezik (Csicsák, 1996). Ezt a kor földtörténet a riftesedéssel, ill. az ehhez kapcsolódó vulkanizmussal jellemzi. A Pannon-medencében több helyen (Dunántúli-Középhegység, Villányi-hegység) megjelennek magmás tevékenységhez kapcsolható felső-kréta karbonátos erek (Demény et al., 1997; Németh, 2006; Azbej et al, 2006). A Tisza térségén a legközelebbi ismert rokonság a Villányi-hegységből ismert, a szintén késő kréta korú vulkáni aktivitáshoz kapcsolódó hidrotermális karbonát erekből (Nédli et al., 2009).

## 8. Következtetések

Tudományos diákköri dolgozatomban a Bodai Aleurolit Formációt átjáró hidrotermás eredetű telérek genetikai vizsgálatával foglalkoztam. Vizsgálataimmal adalék információt igyekeztem nyújtani a BAF - mint lehetséges radioaktív hulladéktároló geológiai egység - kutatásához.

- A fluidumzárvány vizsgálatok alátámasztották, hogy az érkitöltések kis hőmérsékletű hidrotermás eredetűek. A mikrotermometriai vizsgálatok alapján a repedéskitöltéseket létrehozó fluidum 105-177°C közötti hőmérsékletű, 4m/m% szalinitású, a NaCl- H<sub>2</sub>O rendszerrel közelíthető, híg sós oldatok voltak.
- A petrográfiai vizsgálatok, geokémiai megfontolások és az erekben csapdázódott fluidumzárványok becsült érettségi foka alapján az érkitöltések relatív koráról megállapítható, hogy barit által kitöltött erek idősebbek, mint a karbonátos (kalcit és dolomit) kitöltésűek.
- A másodlagos fluidumzárványok jelenléte arra enged következtetni, hogy a törések felújulhattak a földtörténeti idők folyamán.
- A zárványok kismérete és a kőzet ásványos fázisaihoz viszonyított kis térfogataránya arra utalnak, hogy a fluidumzárványok nem járulnak hozzá gyengeségi zónák kialakulásához a kőzetben. A repedéseket a hidrotermás oldatok teljesen kitöltötték, tehát a repedezettség ellenére a kőzet kompakt maradt.
- Földtani analógiák és korolás alapján a BAF karbonátos kitöltésű erei kapcsolódhatnak, késő-kréta riftesedéshez kötődő vulkáni tevékenység által létrehozott hasonló kőzetekhez (pl. Villányi-hegység késő kréta hidrotermás érkitöltései).

## 9. Summary

The main objective of my study was to study the genetic conditions of hydrothermal veins in the Boda Aleurolite Formation. The results of this work may also contribute to research efforts aiming focusing on the Formation as a potential radioactive waste storage site and dealing with the geophysical stability of the unit.

Based on petrographical observations the earliest hydrothermal phase was the barite. After the precipitation barite and subsequent decrease of Ba and  $\text{SO}_4$  concentration in the hydrothermal fluid system, the crystallization of carbonate phases (calcite and dolomite) took place.

Fluid inclusion petrography also confirms this order of events process, as barites contain primary, negative crystal-shaped fluid inclusions while there are angular but irregular shaped fluid inclusions in the calcites. This observation suggests that fluid inclusions in the calcite are less mature than in the barite host minerals.

Microthermometrical measurements show that the inclusions entrapped low-salinity aqueous salt solution containing 3.2 to 4.3 m/m% NaCl. Similar composition fluids have been determined in multiple fluid inclusion assemblages from the host minerals, this we suggest that the hydrothermal parent fluid had not evolved significantly during the crystallization of the carbonates. The homogenization temperatures measured in the inclusions are between 105.3 and 106.8°C which shows us the minimum temperature of entrapment. Based on homogenization temperature and salinity data, and geometric analysis of phase relations on a P-T diagram, the maximum trapping temperature have been determined at 177°C, based on the.

The presence of the secondary fluid inclusions suggests the renewal of the fractures. Considering that the fractures have had healed and the insignificant volumetric portion of small size fluid inclusions (2-8  $\mu\text{m}$ ) fluid we suggest that they do not represent weakness zones or impose any threat on safe radioactive waste storage.

The age of these carbonate-veins by K/Ar dates is Upper Cretaceous. Their formation may be linked to other hydrothermal carbonate-veins which connected to the volcanic activity of



late Cretaceous rifting in the geologic domain. The proximate location similar hydrothermal veins of similar age are known in the Villány Mountains.

### ***9.1. Hereafter***

Further research plans include an extended study on fluid inclusions in these samples entrapped to barite phases in order to get a better picture of the whole timeline of fluid evolution from which these veins had been crystallized. Furthermore, I would like to study samples from other exploration trenches of the area.

## **10. Köszönetnyilvánítás**

Köszönettel tartozom Máthé Zoltánnak a mintagyűjtésben nyújtott segítségével. Köszönettel tartozom Szabó Csaba Tanár Úrnak, hogy bevezetett a csiszolatkészítés világába, oktatott és mindig türelemmel szólt hozzám. Továbbá nagy köszönet illeti Németh Bianka (doktoranda) hatásos és gyors segítségét és Azbej Tristan (konzulens) észrevételeit a méréseknél és a TDK írásnál. Köszönöm Grosch Mariannak a címlap tervezését és Bodor Balázsnak a mikroszkópos képek készítéséhez nyújtott segítségét. Emellett köszönettel tartozom az LRG összes tagjának, hogy a TDK írás nehezebb időszakaiban jó hangulattal és csokival tartották bennem a lelket. Köszönöm a családomnak és barátaimnak, hogy mellettem álltak és bíztattak az egész munka alatt.

## Irodalomjegyzék

- AZBEJ T., SZABÓ Cs., BODNÁR R. J. és DOBOSI G. (2006): Genesis of carbonate aggregates in lamprophyres from the northern Transdanubian Central Range, Hungary: Magmatic or hydrothermal origin? *Mineral. Petrol.* **88**, 479-497.
- ÁRKAI P., BALOGH K., DEMÉNY A., FÓRIZS I., NAGY G. és MÁTHÉ Z. (2000): Composition, diagenetic and post-diagenetic alterations of a possible radioactive waste repository site: the Boda Albitic Claystone Formation, southern Hungary, *Acta. Geol. Hungarica* **43/4**, 351-378.
- BARABÁS A. & BARABÁSNÉ STUHL Á. (1998): A Mecsek és környezete perm képződményeinek rétegtana, *Magyarország geológiai képződményeinek rétegtana. MOL Rt. és a MÁFI kiadványa, Budapest* 187-215.
- BÁRDOSSY, Gy. (1995): Radioaktív hulladék elhelyezésének kérdései Magyarországon. *Magyar Tudomány* **8**, 935-942.
- BÁRDOSSY, Gy. (1999): A radioaktív hulladékok hazai elhelyezésének földtudományi alapjai, *MTA Székfoglalók* pp. 31.
- BODNAR R. J. (1993): Revised equation and table for determining the freezing point depression of H<sub>2</sub>O-NaCl solutions, *Geochimica and Cosmochimica Acta* **57**, 683-684.
- BODNAR R. J. és VITYK M. O. (1994): Interpretation of Microthermometric Data for H<sub>2</sub>O-NaCl Fluid Inclusions in: Fluid Inclusions In Mineral, Methods And Applications, *Short Course in Siena (IMA)* 117-130.
- CSÁSZÁR, G.(2005): Magyarország és környezetének regionális földtana, *MÁFI Kiadvány* p.213-226.
- CSICSÁK, J. (1996): Hydrogeological investigations on a claystone formation in the URL of Hungary, *Topseal'96 Conference Stockholm Vol.II.* 201-204.
- DEMÉNY, A., GATTER, I.& KÁZMÉR, M. (1997): The genesis of mesozoic red calcite dikes of the transdanubian range (Hungary): fluid inclusion thermometry and stable isotope composition
- FÜLÖP, J., BREZSNYÁNSZKY, K. & HAAS, J. (1987): The new map of basin basement of Hungary, *Acta Geologica Hungarica* **30/1-2**, 3-10.
- JÁMBOR, Á. (1964): A Mecsek-hegység alsó-permi képződményei, *Kézirat, OFGA* 112 p.
- KOVÁCS L. (1997): A Bodai Aleurit Formáció kőzetmechanikai és geotechnikai vizsgálati programja. *Bányászati és Kohászati Lapok, Bányászat*, 130, 4, 299-306.
- KOVÁCS, S., SZEDERKÉNYI, T., HAAS, J., BUDA, GY., CSÁSZÁR, G. & NAGYMAROSSY, A. (2000): Tectonostratigraphic terranes in the pre-Neogene

basement of the Hungarian part of the Pannonian area, *Acta Geologica Hungarica* **43/3**, 224-328.

MÁTHÉ Z. (1998): Minerological, petrological, rock geochemical and isotope transport analysis. In: Short-term programme of qualifying the Boda Claystone Formation, *Final Report of Research, (in Hungarian) Mecserkérc Co., Pécs*, 4, pp. 76.

MÁTHÉ Z. (2006): A Bodai Aleurolit Formáció törmelékes közettípusainak ásványtani, közettani és geokémiai jellemzői, *Földtani Közöny* **136/2**, 201-232.

MECSEKÉRC Környezetvédelmi Rt. (1997): A Bodai Aleurolit Formáció kelet-nyugati irányú földtani szelvénye *in Bárdossy 1999*

NÉDLI Zs, M. TÓTH T. és SZABÓ Cs. (2009): A Villányi-hegység felső-kréta lamprofir telérei, Magmás és metamorf képződmények a Tiszai egységben, *GeoLitera* 1-14.

NÉMETH B. (2006): A Dunántúli-középhegységben előforduló vöröskalciterek geokémiai és mikrotermometriai vizsgálata, *TDK dolgozat* Közettani és Geokémiai Tanszék ELTE pp. 42.

ROEDDER E. (1984): Fluid Inclusions. *Reviews in mineralogy* (eds. P.H. Ribbe) Mineralogical Society of America **12**, pp.646.

VAN DEN KERKHOF M. A. és HEIN F. U. (2001): Fluid inclusion petrography, *Lithos* **55**, 27-47.